doi:10.13866/j.azr.2020.03.04

基于小波分析的巴尔喀什湖水位变化特征及其影响因素①

黄 坤[1,2,3]， 马 龙[1,2,3]， 吉力力·阿不都外力[1,2,3]

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院中亚生态与环境研究中心,新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 根据巴尔喀什湖年平均湖水位、伊犁河中下游径流以及流域气象数据,采用线性倾向率、小波时频分析等方法,研究了巴尔喀什湖1880—2016年平均水位变化特征及规律,针对湖泊水量平衡分析得出伊犁河下游径流量是控制湖水位变化的关键因子,通过交叉小波进一步分析了影响湖水位变化的各种气象因素。结果表明:① 巴尔喀什湖水位在2002年左右发生了突变,并存在以83 a为中心尺度的主周期,该尺度下水位变化的平均周期为54 a左右,经历了3个丰枯转换时期,今后将逐步进入枯水期。② 交叉小波分析表明,自然状态下降水是影响湖水位变化的主要原因;径流与气温的共振周期相位在20世纪80年代末发生了由负向正的转变,指示气温升高对湖水位的综合影响表现为由蒸发损耗转变为融水补给增加。③ 大气环流因子通过控制降水,从而影响研究区内入湖径流和湖水位变化,北大西洋涛动(NAO)相较南方涛动(SOI)与径流的关系更为紧密,对湖水位变化的影响较大。

关键词: 巴尔喀什湖; 水位; 径流; 气候变化; 小波分析; 中亚

中亚干旱区受西风环流、北冰洋高纬和印度洋暖湿气流的交错作用,极端气候事件频发、生态系统脆弱,成为全球变化的敏感区域。近百年来,全球气候系统显著变暖,北半球平均气温在过去的130 a上升了0.85 ℃[1],中亚干旱区变暖幅度是北半球的2倍多[2-3]。干旱区湖泊变化是流域气候变化和人类活动的综合体现,近几十年来,受气候和人类活动的影响,中亚地区湖泊面积萎缩、水体咸化趋势加剧。湖泊萎缩以及由此带来的一系列生态环境问题已严重制约了中亚国家的社会经济发展。

巴尔喀什湖是亚洲中部干旱区最大的湖泊生态系统之一[4],其湖泊水位的变化是流域内水量平衡的重要体现[5],在20世纪中后期湖水位迅速降低,直到90年代以后水位出现回升,湖泊水位的变化引起了国内外相关学者的关注[6-8]。Stone[9]研究认为,流域内水资源利用将导致巴尔喀什湖在50 a内缩小成数个小湖泊,面积不超过5 000 km^2。针对巴尔喀什湖现状及未来可能面临的问题,国内外学者基于器测数据对巴尔喀什湖水量平衡[4,8]以及水位/面积变化[5,10-13]等进行了一系列研究,邓铭江等[5]研究认为,卡普恰盖水库的兴建和伊犁河中下游水资源开发利用,导致了近年来入湖径流减少、湖泊水位下降。王姣妍等[4]研究表明,气候变化是湖泊水位动态变化的主导因素,而人类活动是湖泊水量变化的强化因素,对于自然状态下出现的湖泊水位大幅涨落的原因还有待深入研究。总体而言,干旱区湖泊水环境变化的响应过程研究的欠缺,导致湖泊水环境未来变化的不确定性显著增强,给科学制定湖泊流域管理与保护对策带来显著影响。因此,本研究试图从基础层面通过突变检验、小波分析阐释巴尔喀什湖水位变化特征,利用交叉小波并结合入湖径流进一步研究气温、降水及大气环流指标等因素对湖泊水环境变化的影响因素,以期为巴尔喀什湖水环境保护及其应对全球变化提供决策支持。

1 研究区概况

巴尔喀什湖位于哈萨克斯坦东南部(图1),

① **收稿日期:** 2019-05-27; **修订日期:** 2019-11-07
基金项目: 中国科学院西部之光人才培养项目(2016-QNXZ-A-4);新疆维吾尔自治区天山青年计划(2018Q008);国家自然科学基金-新疆联合基金重点项目(U1603242)资助
作者简介: 黄坤(1994-),男,硕士研究生,主要从事干旱区环境演变研究. E-mail: huangkun17@mails.ucas.ac.cn
通讯作者: 马龙. E-mail: malong@ms.xjb.ac.cn

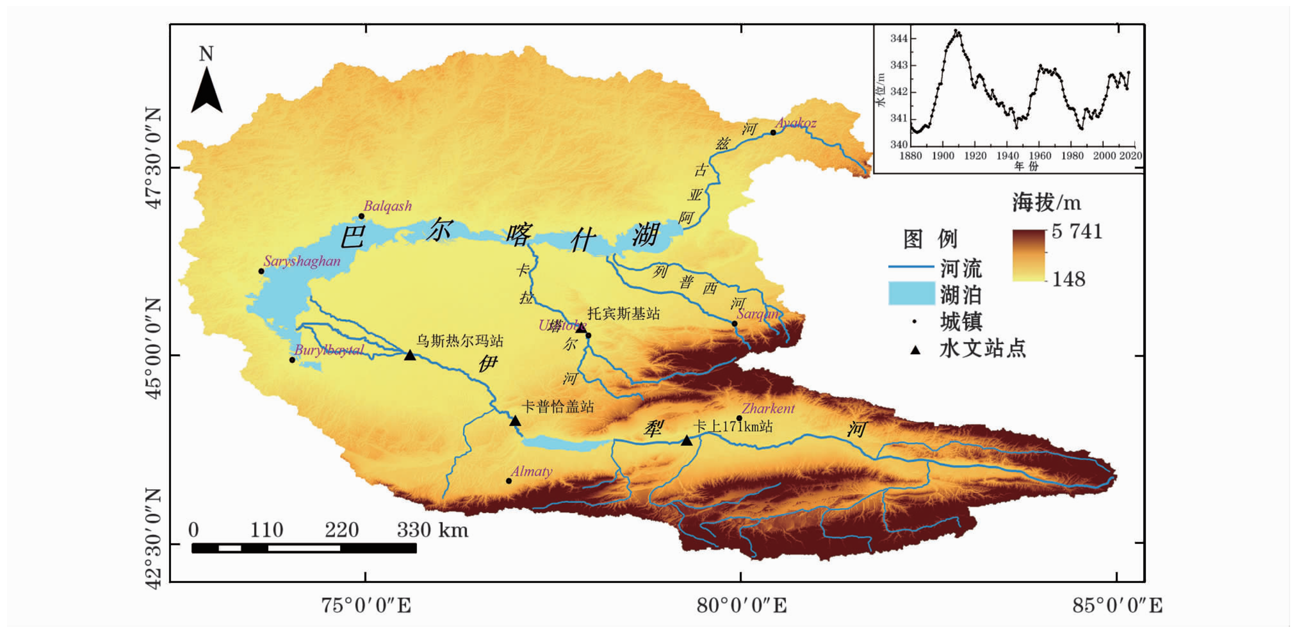


图 1 巴尔喀什湖流域水文站点及其 1880—2016 年水位变化

Fig. 1 Distribution of main hydrologic station, and the changes of water level in Lake Balkhash in 1880 – 2016

2014 年湖泊面积约 17 000 km^2[11]。巴尔喀什湖被乌曾阿拉尔半岛分为东西两个大致相等的湖区,西半部广而浅,水深不超过 11 m,东半部窄而深,平均水深 25 m。流入巴尔喀什湖的主要河流有伊犁河、卡拉塔尔河、列普西河、阿亚古兹河等。由于近 80% 入湖径流的伊犁河经伊犁河三角洲注入西湖[10],导致西湖水体矿化度明显低于东湖。巴尔喀什湖流域面积 4.13×10^5 km^2,其中 14% 位于中国境内,流域属大陆性气候,年平均气温 3 ~ 10 ℃,降水量在 130 ~ 450 mm,且在空间上存在明显差异,其中东南部天山地区受海拔影响最为湿润[14]。湖区气候干旱,年均降水仅有 150 mm,而蒸发量达到 1 000 mm,7 月平均气温 30 ℃,1 月平均气温 – 14 ℃,年平均气温 6 ℃[15]。

2 资料与方法

2.1 数据来源

气温、降水数据使用英国东英吉利亚大学气象格点数据集 cru_ts_4.01 (http://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/cru_ts_4.01/),时间为 1931—2016 年,在 ArcGIS 中根据巴尔喀什湖流域矢量图裁剪,得到流域范围内空间分辨率为 0.5° ×0.5°的网格化数据,使用 R 语言逐一计算流域内各年份格点的平均值,得到气温和降水的时间序列。1880—2016 年平均湖水水位引自文献[8,12],1931—2000 年伊犁河上游 4 站平均、卡上 171 km 站、卡普恰盖水库出库站、乌斯热尔玛站以及卡拉塔尔河的托宾斯基站年均径流数据引自文献[5]。北大西洋涛动指数(NAO)来自美国国家海洋和大气气候预测中心(http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml),南方涛动指数(SOI)来自澳大利亚气象局(http://www.bom.gov.au/climate/current/soi2.shtml)。

2.2 研究方法

2.2.1 线性倾向率、滑动平均法 本文运用线性倾向率、滑动平均对流域气象因子进行分析,研究全球变化背景下巴尔喀什湖流域气候要素时间上的变化趋势及特点。

2.2.2 连续小波变换 采用连续小波变换(CWT)[16]来揭示水位时间序列中的周期时频变化特征,预估其未来发展趋势。本文选取复 Morlet 小波函数作为基函数进行小波变换[17 – 18]:

$$\Psi_0(t)=\pi^{-1/4}e^{i\omega_0 t}e^{-t^2/2} \quad (1)$$

式中:$\Psi(t)$为小波函数;i 表示虚数;e 为自然对数;t 为时间;ω_0 为无量纲频率。

对于给定时间序列和 Morlet 小波,其连续小波变换为:

$$W_f(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (2)$$

式中：a 为时间尺度，反映时间序列的周期长度；b 为时间变化；$W_f(a,b)$ 为小波变换系数。湖水位小波系数实部的等值线能够反映不同时间尺度下湖水位的周期变化以及在时间域上的分布[19]，实部系数为正表示水位为上升阶段，负数则表示水位下降，等值线越密集表明信号越强。

2.2.3 交叉小波变换 交叉小波功率谱（XWT）可以从多时间尺度显示两个时间序列在时频域中高能量区的相关关系。对于两个时间序列 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间交叉小波功率谱如下[20]：

$$W_{XY}(a,\tau)=C_X(a,\tau)C_Y^*(a,\tau) \tag{3}$$

式中：$W_{XY}(a,\tau)$ 为交叉小波功率谱；$C_X(a,\tau)$ 为尺度伸缩参数 a 和时间平移参数 τ 下的小波变换系数；$C_Y^*(a,\tau)$ 为序列 $y(t)$ 小波变换系数的复共轭。

而小波凝聚谱（WTC）更侧重于两时间序列在低能量区的相关性[19]，交叉小波凝聚谱定义如下[20]：

$$R^2(a,\tau)=\frac{|S[a^{-1}W_{XY}(a,\tau)]|^2}{S[a^{-1}W_X(a,\tau)]S[a^{-1}W_Y(a,\tau)]} \tag{4}$$

式中：S 为平滑算子。

在交叉小波功率谱与交叉小波凝聚谱的图中，黑色实线边界效应影响椎，粗黑线表示通过显著性水平为 0.05 的红噪声检验，箭头表示两个时间序列的相位关系，→表示二者为同相位，←表示为反相位或后者领先前者 180°，↓ 和 ↑ 分别表示后者领先 90°、270°[19, 21]。

3 结果与讨论

3.1 巴尔喀什湖湖水位变化的周期性

巴尔喀什湖水位始测于 1931 年，1880—1930 年为延长资料[4]，由图 1 可知，1880—2016 年巴尔喀什湖水位经历了频繁的波动，具有明显的丰枯交替变化特征。3 个枯水年分别发生在 1884 年、1946 年和 1987 年，在人类活动较弱的 19 世纪及 20 世纪上半叶湖泊依然出现过极低水位，说明巴尔喀什湖水位变化易受自然气候影响。

采用 Morlet 小波对巴尔喀什湖 1880—2016 年年均湖泊水位变化进行连续小波变换（图 2）可以看出，百年来巴尔喀什湖水位的变化具有多时间尺度的频率结构，主要表现为年代际的变化，以 80 a 为中心尺度的周期信号贯穿了整个研究期，等值密集表明信号较强。20 世纪 70 年代之前存在以 45 ~ 50 a 尺度为主的周期振荡，在时域中表现为逐渐增大的趋势，70年代后的消失表明，湖水位受外部环

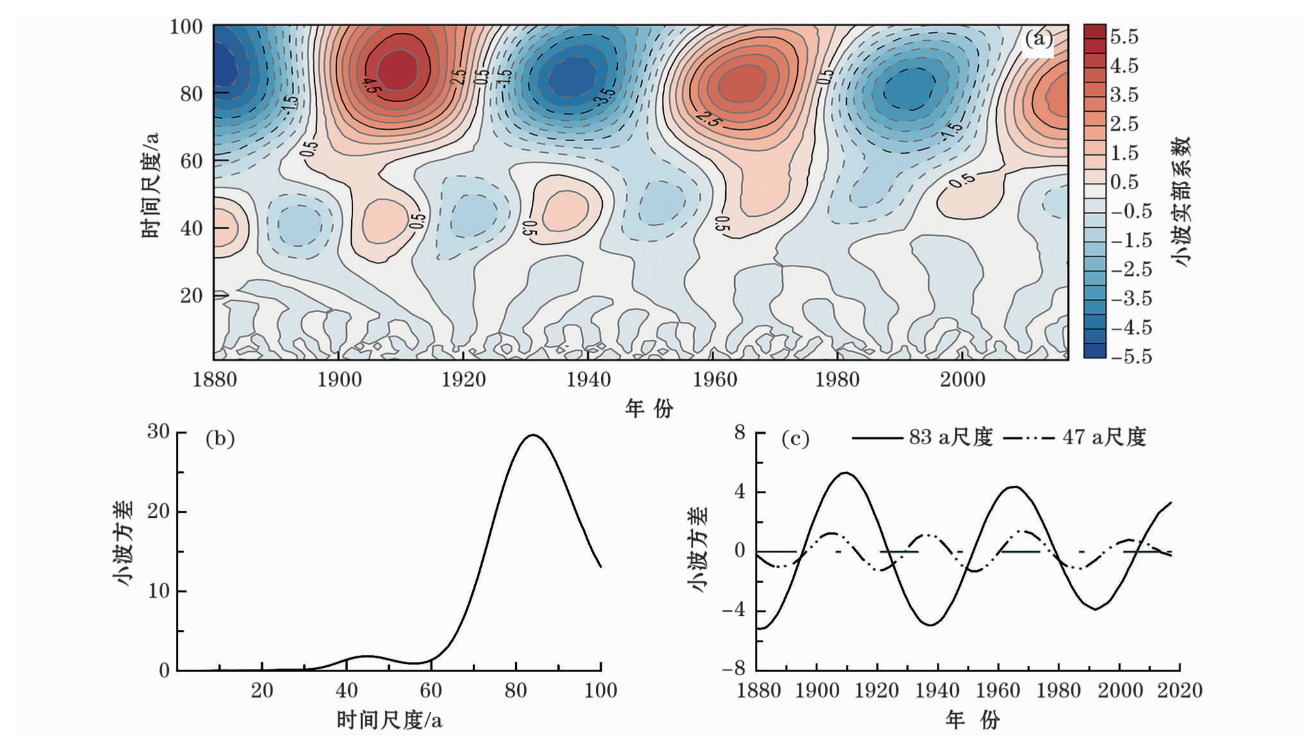
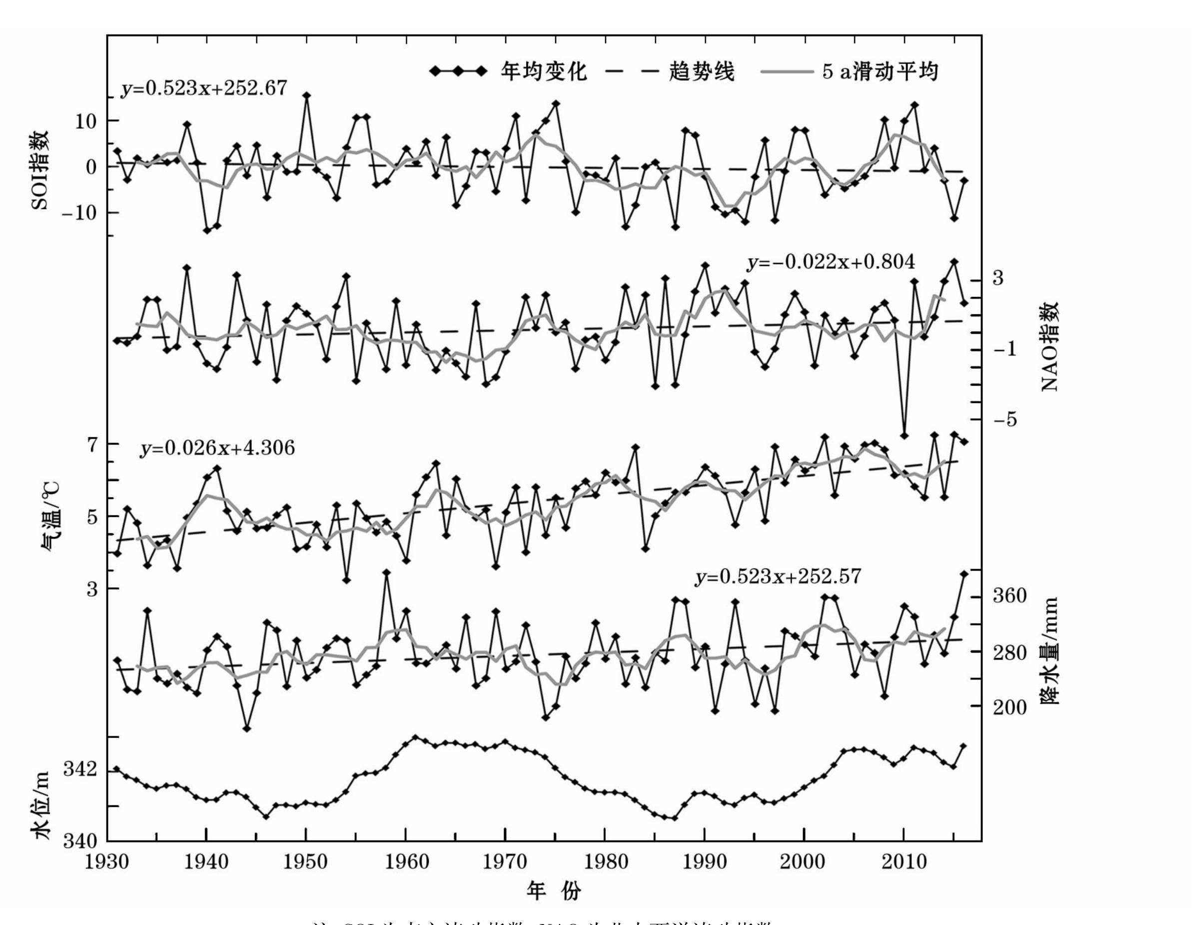


图 2 1880—2016 年巴尔喀什湖年均湖水水位小波分析

Fig. 2 Isoline of the real part of Morlet wavelet coefficients, wavelet variance and the wavelet coefficient curves for the lake level of Lake Balkhash in 1880 – 2016



注:SOI 为南方涛动指数,NAO 为北大西洋涛动指数。

图 3　1931—2016 年巴尔喀什湖流域气象因子年际变化及趋势

Fig. 3　Inter-annul variation and tendency of meteorological factors in Lake Balkhash basin from 1931 to 2016

境影响发生突变,指示受到该时期卡普恰盖水库蓄水等人类活动影响,从而引起入湖径流减少。小波方差能够反映水位时间序列的波动能量随尺度的分布情况,可用来确定水位演化过程中存在的主周期[17],巴尔喀什湖年均水位小波方差图(图 2b)显示,在 83 a、47 a 存在极值,83 a 左右周期对小波方差贡献较大,为湖水位变化的主周期。小波系数过程线可以反映数据序列在该尺度下的波动信息[22],在 83 a 时间尺度上,水位变化的平均周期为 54 a 左右,约经历了 3 个丰枯转换时期,相对偏高的时期包括 1895—1933 年、1952—1978 年、2005—2016 年,而在 1880—1894 年、1934—1951 年、1979—2004 年湖水位处于相对偏低时期[21]。而在 47 a 时间尺度上,水位变化的平均周期为 32 a 左右,约经历了 4 个丰枯转换时期。湖水变化的主周期显示,现阶段湖水位处于丰水期的中心时段,根据其水位丰枯交替规律,巴尔喀什湖水位在此后将逐步进入枯水期。

3.2　气候变化特征

巴尔喀什湖流域年平均气温自 1931 年以来呈上升趋势(图 3),气温变化率为 0.259 ℃·$(10a)^{-1}$,高于同时期全球平均陆地表层气温变化速率〔0.16 ℃·$(10a)^{-1}$〕[5]以及新疆地表气温变化率〔0.229 ℃·$(10a)^{-1}$〕,5 a 的滑动平均显示出,20 世纪 30—80 年代气温呈波动上升,至 80 年代中后期气温上升的速率加快。流域年平均降水量以 5.233 mm·$(10a)^{-1}$的速率缓慢增加,变化范围基本集中在 200~350 mm,在 1944 年和 1974 年出现极小值,1958 年出现极大值,到 90 年代以后降水量快速增加。从 5 a 滑动平均可以看出,在 50 年代中期以前降水变化波动较小(其标准差为 sd=42.2),而后变化的波动性明显增大(sd=48.71),与前人利用巴尔喀什湖流域站点气象数据分析结果基本一致[15, 23],流域整体气候向暖湿化转变。NAO 和 SOI 的线性倾向率分别为 0.022 a^{-1},0.523 a^{-1}。

3.3　水位变化的影响因素

湖泊水位变化是其水量平衡的直接结果,巴尔喀什湖水量收入包括入湖径流和湖面降水,支出项主要为湖面蒸发。研究显示[8],自 1930 年以来湖泊

表 1 伊犁河各段径流与卡拉塔尔河径流的相关系数[10]

Tab. 1 Correlation coefficient for runoff of Ili River and Karatal River

	乌斯热尔玛站	卡普恰盖站	卡上 171 km	萨雷托加站	上游四站综合
相关系数	0.737	0.831	0.876	0.866	0.923
P 值	6.64×10^{-10}	4.50×10^{-14}	3.73×10^{-17}	2.18×10^{-16}	1.93×10^{-19}

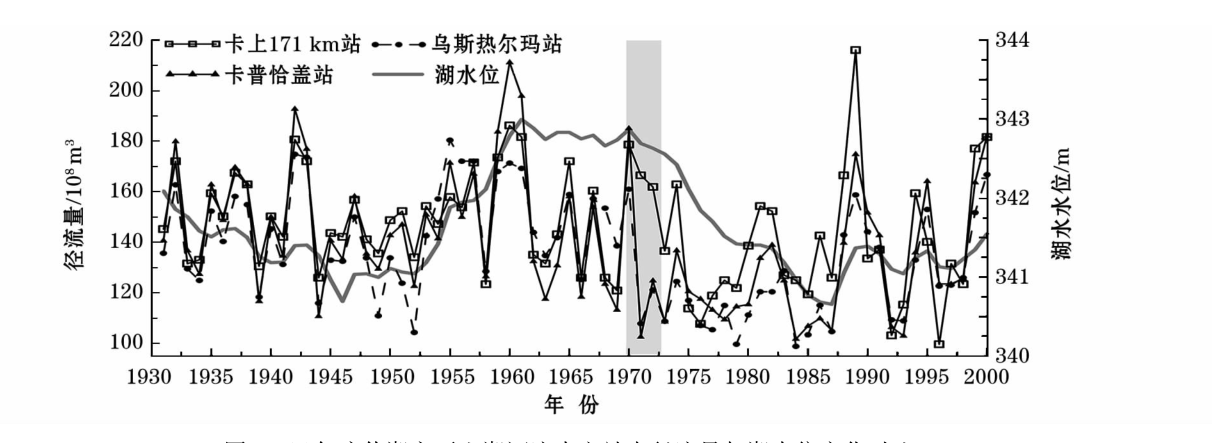


图 4 巴尔喀什湖主要入湖河流水文站点径流量与湖水位变化对比

Fig. 4 Comparison of runoff variation for the hydrologic station of main inflow rivers and water level of Lake Balkhash

水量平衡的支出项湖面蒸发基本稳定，但主要收项入湖径流受到流域气候以及人类活动影响而变化剧烈，而这其中以伊犁河（占入湖径流的 78%）与卡拉塔尔河（占入湖径流的 15%）注入水量最大（表 1）[10]，因此，这二者的入湖水量在一定程度上对湖水位有决定性的影响。

利用相关系数来研究上述两条河流不同水文站点径流量的关系，得到卡拉塔尔河年均径流量与伊犁河卡普恰盖上游多个水文站点[5]径流的相关系数均在 0.85 以上（$P<0.01$），表明二者对环境变化响应的一致性较好。从图 4 可以看出，1970 年以前伊犁河 3 个水文站点径流与湖水位变化趋势较为相近，之后卡普恰盖水库建成蓄水等人类活动影响，造成水库上下游径流差异显著，湖水位出现迅速下降。综上所述，考虑以卡普恰盖水库上游径流代表自然状态下的入湖径流，并通过交叉小波进一步分析其与气温、降水等区域气象因素之间的关系。

3.3.1 区域气象因素 对连续小波变换后的系数进行双时间序列的交叉小波变换，得到气象因素与伊犁河径流的交叉小波功率谱和小波凝聚谱[24]（图 5）。从气温与径流的交叉小波功率谱（图 5a）中可以看到，二者存在 3 个显著的共振周期，其中 1956—1963 年和 1964—1969 年的 5～6 a、2 a 共振周期显示为反相位，而 1981—1987 年的 8～11 a 周期为同相位。交叉小波凝聚谱（图 5c）中存在 3 个显著的负相关关系，分别在 20 世纪 40 年代之前、1955—1962 年、90 年代以后，而 40 年代和 80 年代，存在两个在统计上不显著但正相关的区域，正反相位的转变说明巴尔喀什湖流域气温对径流量的影响方式可能出现变化。一般来说，对于存在雪冰融水补给的河流，气温的升高能够加快雪冰的消融，提供河流更多的补给；但另一方面，也会加大流域的蒸发损耗，从而减少径流。1960 年前后的负相关，气温经历了先下降再上升，巴尔喀什湖水位的变化与径流量几乎同步上升再下降，气温升高的综合结果以蒸发为主。80 年代后的 8～11 a 尺度共振周期内，气温与径流均表现为正相关，说明气温的快速升高〔变化率为 0.338 ℃·$(10a)^{-1}$〕在短期内加剧了雪冰消融，河流补给的增多掩盖了由增温引起的蒸发损耗，并造成了湖水位的上涨。

交叉小波功率谱（图 5b）显示，降水量和流域径流有 5 个显著的共振周期，全部为同相位，其中两个能量较高的共振周期包括 5～7 a（1954—1963 年）、6～11 a（1971—1995 年），其中 6～11 a 的正相关在频域上表现为由低频向高频过渡。此外，还有 6 a 左右、1～3 a、3 a 左右的共振周期，但能量相对较弱，且通过置信检验的区域面积较小，为间歇性准周期震荡[25]。小波凝聚谱中（图 5d）显示的通过 95% 的红噪声检验的区域占据了影响椎的大部[24]，表明二者在低能量区的相关程度大于高能量区，6～12 a 的主周期近乎穿越影响椎的时域，在 1939—1945 年、1965—1980年间分别存在 6～8 a、1～5 a的

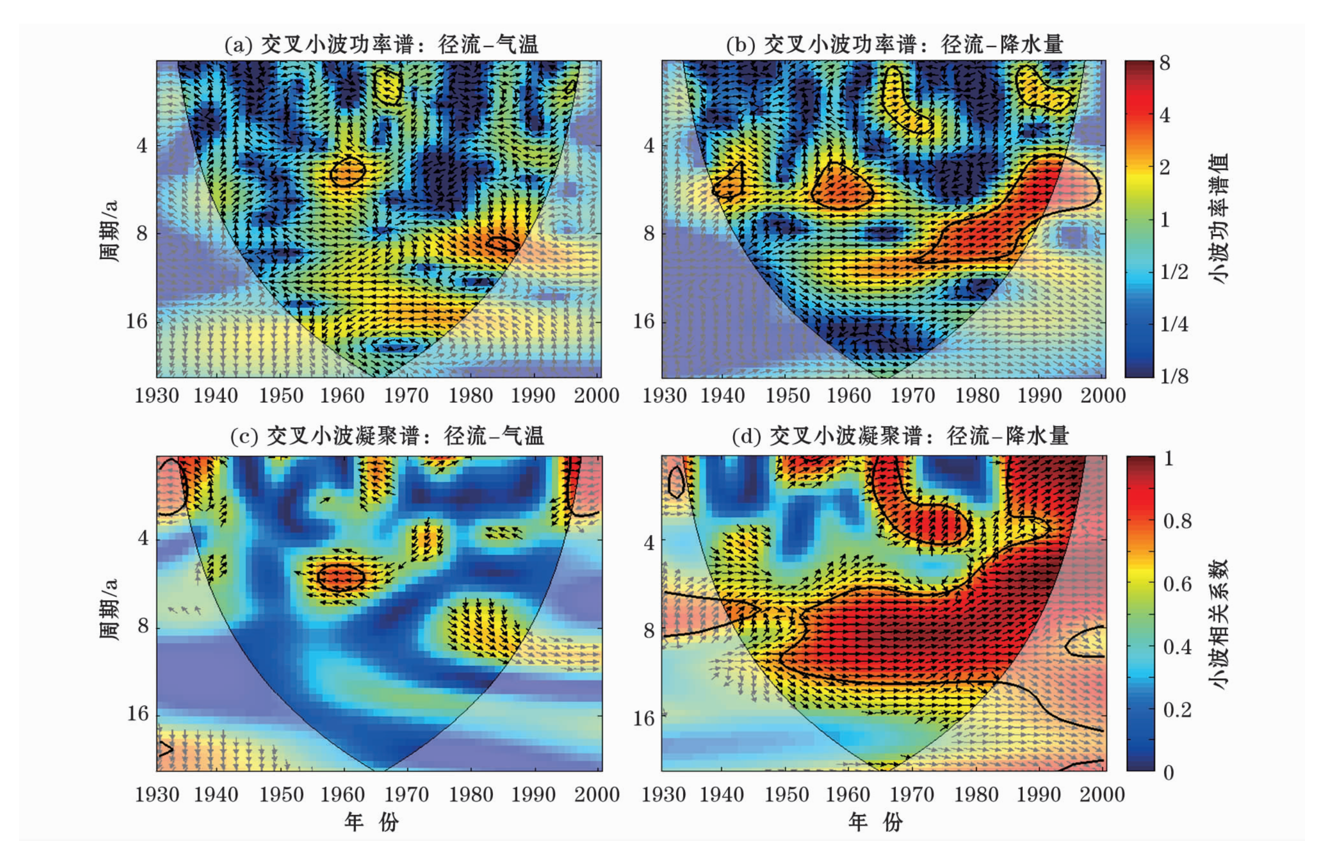


图 5　径流与气温和降水的交叉小波图

Fig. 5　Cross wavelet transform between annual temperature, annual average precipitation and runoff

正相关,相关系数在 0.9 以上,表明降水相较于气温对径流变化起主导作用,进而影响湖水位变化。

3.3.2　大气环流因素　大气环流异常可能通过影响中亚地区水汽输送,从而改变径流的主要控制因素降水。亚洲中部干旱区降水的水汽主要来源于西风环流,戴新刚等[26]研究认为,在 NAO 的极端负位相年,西风增强,从欧洲南部向中亚的水汽输送增强,中亚地区降水增加。此外,相关研究[27]发现,当厄尔尼诺事件发生时,强烈的西南暖湿气流带来了大量的水分,穿过阿拉伯半岛进一步向北移动,导致亚洲中部降水增加。

NAO 与径流的交叉小波功率谱显示,在高能区(图 6a)存在 4 个显著的共振周期,在 5 ~ 6 a(1936—1944 年)、1 ~ 2 a(1985—1989 年)及 7 ~ 11 a(1972—1988 年)尺度上二者表现为负相关,而在 1990—1998 年 4 ~ 6 a 的显著共振周期,两者为正相关。二者的共振周期在 1990 年左右发生突变,表明伊犁河进入丰水周期。在低能区(图 6c)共有 3 个共振周期,1955—2000 年 7 ~ 14 a 共振周期显示相关系数达到 0.9 以上,表明伊犁河径流在此期间受 NAO 影响明显,二者相位差为 90°,径流滞后 NAO 约 2 ~ 4 a,自 1974 年起的自然枯水期正对应了 NAO 从 1971 年由负相位转为正相位,进一步加速了水库蓄水引起的湖水位下降。

SOI 与径流的小波功率谱显示(图 6b),在 1953—1962 年、1987—1994 年存在 4 ~ 7 a 的共振周期,SOI 分别领先径流 120°、90°,1967—1974 年 3 ~ 4 a 的周期中二者为负相关,小波凝聚谱(图 6d)中通过显著性检验的共振周期范围较小,但 20 世纪 90 年代出现了 1 ~ 2 a、7 a、16 a 的 3 个显著共振周期,径流的变化可能与这一时期的厄尔尼诺事件有关。对 1980—2000 年卡普恰盖站径流量和南方涛动指数的相关分析显示,相关系数达到 0.43($P < 0.05$),表明二者之间具有较强的相关性。此外,伊犁河径流对 1986—1987 年、1991—1994 年、1997—1998 年 3 个厄尔尼诺年均有良好的响应且呈增加趋势(图 3),相应地巴尔喀什湖水位在 90 年代前后呈波动性上升。

分析可知,巴尔喀什湖流域在人类活动较弱的 20 世纪 70 年代以前,湖水位主要受流域的气候条件影响,特别是流域的降水状况决定了湖水位的升降,气温升高在不同时期则存在正负效应的转换。

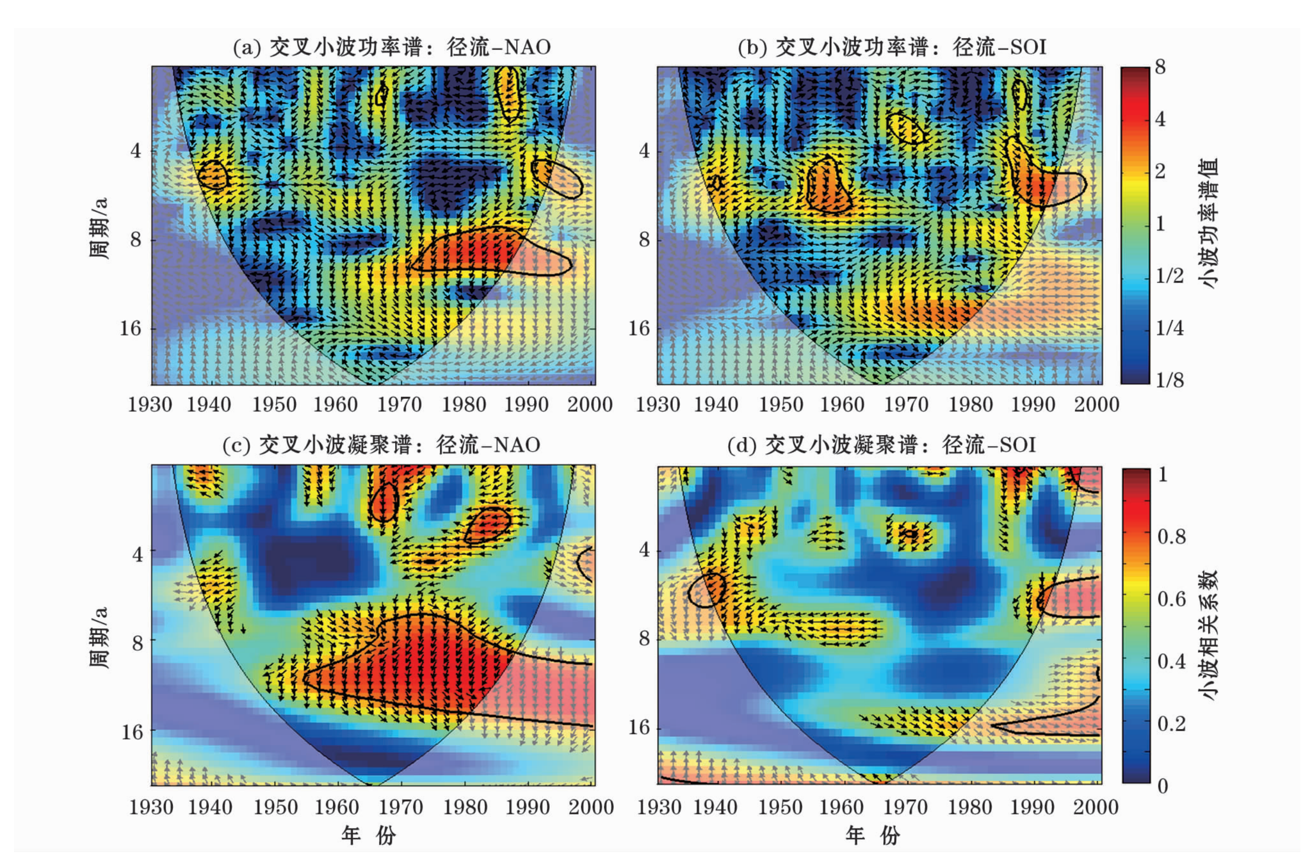


图 6 径流与 NAO 和 SOI 的交叉小波图

Fig. 6 Cross wavelet transform between annual NAO, annual SOI and runoff

70 年代后的湖水位迅速下降除了由于正处于降水偏少的枯水期外，更受到卡普恰盖水库蓄水和哈萨克斯坦境内灌区耕地扩张[28]等人类活动影响。到 80 年代中后期气温在短时间内急剧上升，雪冰对这种信号发生响应，融水补给增多，使得伊犁河径流以及巴尔喀什湖水位出现上涨趋势。宏观上，受到西风环流与印度洋暖湿气流影响的巴尔喀什湖流域，NAO 和 SOI 均与其降水有关，从而能够影响径流以及湖水位变化，NAO 与径流的相关性更强，而 SOI 反映的厄尔尼诺事件则与 1987 年后水位间歇性回升存在一定联系。

处于亚洲中部干旱区的伊塞克湖[17]、博斯腾湖[29]、艾比湖[30]等湖泊，自 20 世纪 50—60 年代受流域人口快速增加，农业耗水剧增等影响，湖面萎缩水位迅速下降，20 世纪末人类活动强度减弱，加上区域降水增加使水位上涨，总体来说湖水位变化与人类活动关系密切。相比于上述中亚湖泊，巴尔喀什湖水位变化受人类活动影响时间较短、程度较小，且在自然状态下具有明显的周期性，这些不同尺度的周期可能来自于大气环流以及太阳活动的准周期变化[31]。此外，巴尔喀什湖存在雪冰融水补给，流域内气温从 20 世纪 80 年代末转暖，给湖水位变化带来了不确定性。Propastin[10]认为气温快速上升近二十多年来，虽然降水依旧是维持湖泊水位的重要来源，但同时雪冰融水补给的不断增多使其与降水几乎已同等重要。研究显示[32]，作为巴尔喀什湖重要补给来源天山积雪和冰川，近 50 年来其面积缩小了 11.5%，其中伊犁河流域的冰川面积减少最多，储量亏损占天山冰川总亏损的 20%。因此，尽管巴尔喀什湖水位在自然状态下就存在较大的周期性变化，但 20 世纪 90 年代起的水位回升与伊犁河上游积雪覆盖及冰川平衡关系紧密，这意味着巴尔喀什湖水位未来可能受到全球变暖背景下天山冰川进一步退缩而出现下降。

4 结 论

本文基于小波时频分析法分析了巴尔喀什湖水位变化特征，探讨了湖泊水量平衡的关键要素以及气象因子的变化特征，并采用交叉小波对湖水位变化影响因素进行了研究，结论如下：

(1) 近百年来，巴尔喀什湖水位波动频繁。湖水位存在以 83 a 和 47 a 为中心尺度的周期，其中

83 a 周期对小波方差贡献最大,为主周期,在该尺度下目前湖水位正处于相对较高的时期,此后将逐步进入枯水期。

(2) 气温与径流在 20 世纪 80 年代的显著共振周期相位由负转正,指示增温加快导致雪冰融水补给的增加超过蒸发引起的损耗,加之,同时期降水量的增加使湖水位的迅速回升。总体上降水是自然状态下影响径流和湖水位变化的主要原因。

(3) 大气环流因子通过控制降水从而影响研究区内入湖径流和湖水位变化。其中,NAO 对湖水位变化起主导作用,并存在 2 ~ 4 a 的滞后,而 SOI 反映的厄尔尼诺事件则与 1987 年后湖水位回升联系密切。

参考文献(References):

[1] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1068 - 1076. [Shen Yongping, Wang Guoya. Key finding and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(5):1068 - 1076.]

[2] 姚俊强,刘志辉,杨青,等. 近 130 年来中亚干旱区典型流域气温变化及其影响因子[J]. 地理学报,2014,69(3):291 - 302. [Yao Junqiang, Liu Zhihui, Yang Qing, et al. Temperature variability and its possible causes in the typical basins of the arid Central Asia in recent 130 years[J]. Acta Geographica Sinica,2014,69(3):291 - 302.]

[3] Chen F, Wang J, Jin L, et al. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years[J]. Frontiers of Earth Science in China,2009,3(1):42 - 50.

[4] 王姣妍,龙爱华,邓铭江,等. 巴尔喀什湖分湖水平衡及其影响与优化保护研究[J]. 冰川冻土,2011,33(6):1353 - 1362. [Wang Jiaoyan, Long Aihua, Deng Mingjiang, et al. Water balances of east and west Lake Balkhash and their optimization management[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2011,33(6):1353 - 1362.]

[5] 邓铭江,王志杰,王姣妍. 巴尔喀什湖生态水位演变分析及调控对策[J]. 水利学报,2011,42(4):403 - 413. [Deng Mingjiang, Wang Zhijie, Wang Jiaoyan. Analysis of Balkhash Lake ecological water level evolvement and its regulation strategy[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2011,42(4):403 - 413.]

[6] 杨川德. 巴尔喀什湖水位变化及其原因[J]. 干旱区地理,1993,16(1):36 - 42. [Yang Chuande. Water level of Balkhash Lake and its reason for change[J]. Arid Land Geography,1993,16(1):36 - 42.]

[7] Panyushkina I P, Meko D M, Macklin M G, et al. Runoff variations in Lake Balkhash Basin, Central Asia, 1779 - 2015, inferred from tree rings[J]. Climate Dynamics,2018,51(7 - 8):3161 - 3177.

[8] 龙爱华,邓铭江,谢蕾,等. 巴尔喀什湖水量平衡研究[J]. 冰川冻土,2011,33(6):1341 - 1352. [Long Aihua, Deng Mingjiang, Xie Lei, et al. A study of the water balance of Lake Balkhash[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1341 - 1352.]

[9] Stone R. For China and Kazakhstan, no meeting of the minds on water[J]. Science,2012,337(6093):405 - 407.

[10] Propastin P. Patterns of Lake Balkhash water level changes and their climatic correlates during 1992 - 2010 period[J]. Lakes & Reservoirs Research & Management,2012,17(3):161 - 169.

[11] 高彦华,王洪亮,周旭,等. 巴尔喀什湖近 30 余年动态变化遥感监测与分析[J]. 环境与可持续发展,2016,41(1):102 - 106. [Gao Yanhua, Wang Hongliang, Zhou Xu, et al. Remote sensing monitoring and analyses of the dynamic change of Balkhash Lake in the last 30 years[J]. Environment and Sustainable Development,2016,41(1):102 - 106.]

[12] 郭利丹,夏自强,王志坚. 咸海和巴尔喀什湖水文变化与环境效应对比[J]. 水科学进展,2011,22(6):764 - 770. [Guo Lidan, Xia Ziqiang, Wang Zhijian. Comparisons of hydrological variations and environmental effects between Aral Sea and Lake Balkhash[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 764 - 770.]

[13] Myrzakhmetov A, Dostayzh, Alimkulov S, et al. Level regime of Balkhash Lake as the indicator of the state of the environmental ecosystems of the region[J]. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, 2017, 4(9):4554 - 4563.

[14] 杨川德. 亚洲中部湖泊近期变化[M]. 北京:气象出版社,1993:15 - 25. [Yang Chuande. Recent Changes of Lakes in Central Asia[M]. Benjing: China Meteorological Press, 1993: 15 - 25.]

[15] Guo L, Xia Z. Temperature and precipitation long-term trends and variations in the Ili-Balkhash Basin[J]. Theoretical & Applied Climatology,2014,115(1 - 2):219 - 229.

[16] 孙卫国,程炳岩,杨沈斌,等. 区域气候变化对华东地区水稻产量的影响[J]. 中国农业气象,2011,32(2):227 - 234. [Sun Weiguo, Cheng Bingyan, Yang Shenbin, et al. Impact of the regional climate variation on rice yield in East China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2011,32(2):227 - 234.]

[17] 米热古力·艾尼瓦尔,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等. 基于小波分析的伊塞克湖水位变化特征[J]. 水土保持研究,2014,21(1):168 - 172. [Mihrigul Anwar, Hamid Yimit, Mamattursun Eziz, et al. Water level variations of Issyk-Kul Lake based on wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation,2014,21(1):168 - 172.]

[18] 王涛,霍彦峰,罗艳,等. 近 300 a 来天山中西部降水与太阳活动的小波分析[J]. 干旱区研究,2016,33(4):708 - 717. [Wang Tao, Huo Yanfeng, Luo Yan, et al. Precipitation and sunspots in the Central-West Tianshan Mountains in recent 300 years

[J]. Arid Zone Research,2016,33(4):708 – 717.]

[19] 侯迎,郑芳,邵议.基于交叉小波的多尺度气候变化及其对径流的影响[J].水资源研究,2016,5(6):564 – 572.[Hou Ying, Zheng Fang, Shao Yi. The multi-timescale climate change and its impact on runoff based on cross-wavelet transformation[J]. Journal of Water Resources Research,2016,5(6):564 – 572.]

[20] 刘友存,刘志方,郝永红,等.基于交叉小波的天山乌鲁木齐河出山径流多尺度特征研究[J].冰川冻土,2013,35(6):1564 – 1572.[Liu Youcun, Liu Zhifang, Hao Yonghong, et al. Multi-time scale characteristics of the runoff in the up stream of Urumchi River, Tianshan Mountains, based on cross-wavelet transformation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1564 – 1572.]

[21] 王大伟,师庆东,董弟文,等.新疆克里雅河径流量变化的气候响应[J].干旱区研究,2018,35(6):1271 – 1279.[Wang Dawei, Shi Qingdong, Dong Diwen, et al. Response of runoff volume change to climate in the Keriya River in Xinjiang[J]. Arid Zone Research,2018,35(6):1271 – 1279.]

[22] 谭娇,丁建丽,张钧泳,等.1961 – 2014 年新疆北部地区气温时空变化特征[J].干旱区研究,2018,35(5):1181 – 1191.[Tan Jiao, Ding Jianli, Zhang Junyong, et al. Spatiotemporal variation of temperature in North Xinjiang during the period of 1961 – 2014 [J]. Arid Zone Research,2018,35(5):1181 – 1191.]

[23] 郭利丹,夏自强,李捷,等.巴尔喀什湖流域气候变化特征分析[J].河海大学学报(自然科学版),2008,36(3):316 – 321. [Guo Lidan, Xia Ziqiang, Li Jie, et al. Characteristics of climatic change in the Balkhash Lake Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences Edition),2008,36(3):316 – 321.]

[24] 胡胜,邱海军,宋进喜,等.气候变化对秦岭北坡径流过程的影响机制研究——以灞河流域为例[J].干旱区地理,2017,40(5):46 – 57.[Hu Sheng, Qiu Haijun, Song Jinxi, et al. Influencing mechanisms of climate change on runoff process in the north slope of Qinling Mountains: A case of the Bahe River Basin[J]. Arid Land Geography,2017,40(5):46 – 57.]

[25] 刘志方,刘友存,郝永红,等.黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J].干旱区地理,2014,37(6):1137 – 1146.[Liu Zhifang, Liu Youcun, Hao Yonghong, et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River[J]. Arid Land Geography, 2014,37(6):1137 – 1146.]

[26] 戴新刚,汪萍,张凯静.近 60 年新疆降水趋势与波动机制分析[J].物理学报,2013,62(12):527 – 537.[Dai Xingang, Wang Ping, Zhang Kaijing. A study on precipitation trend and fluctuation mechanism in Northwestern China over the past 60 years[J]. Acta Physica Sinica,2013,62(12):527 – 537.]

[27] Mariotti, Annarita. How ENSO impacts precipitation in Southwest Central Asia[J]. Geophysical Research Letters,2007,34(16):1 – 5.

[28] Kezer K, Matsuyama H. Decrease of river runoff in the Lake Balkhash basin in Central Asia[J]. Hydrological Processes,2010,20(6):1407 – 1423.

[29] 伊丽努尔・阿力甫江,海米提・依米提,麦麦提吐尔逊・艾则孜,等.1958—2012 年博斯腾湖水位变化驱动力[J].中国沙漠,2015,35(1):240 – 247.[Ilnur Ghalip, Hamid Yimit, Mamattursun Rusuli, et al. The driving forces of the Bosten Lake water level variations in 1958 – 2012[J]. Journal of Desert Research, 2015,35(1):240 – 247.]

[30] 吴敬禄,林琳.新疆艾比湖湖面波动特征及其原因[J].海洋与第四纪地质,2004,24(1):11 – 19.[Wu Jinglun, Lin Lin. Characteristics and reasons of fluctuation of lake sueface of the Aibi Lake, Xinjiang autonomous region[J]. Journal of Lake Sciences, 2004,24(1):11 – 19.]

[31] Pérez-Peraza J A, Y L I. Highlights in Helioclimatology: About Possible Analysis of Solar Activity Influence on Terrestrial Processes [M]. Boston: Elsivier,2012.

[32] 王圣杰,张明军,李忠勤,等.近 50 年来中国天山冰川面积变化对气候的响应[J].地理学报,2011,66(1):38 – 46.[Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Response of glacier area variation to climate change in chinese tianshan mountains in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica,2011,66(1):38 – 46.]

A study of the water level variation of Lake Balkhash: Its influencing factors based on wavelet analysis

HUANG Kun[1,2,3], MA Long[1,2,3], Jilili Abuduwaili[1,2,3]

(1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*;

2. *Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*;

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Based on the annual average lake level of the Lake Balkhash, runoff of Ili River, and the meteorological data in the basin, we analyzed the characteristics and regularity of the average water level change of Lake Balkhash from 1880 to 2016 by using the wavelet time-frequency analysis method. Water balance data showed that the runoff in the lower reaches of the Ili River is a key factor controlling variation in the lake level. Cross-wavelet analysis was applied to further analyze the relationship between the lake level changes and the main meteorological factors. The results suggested that the main cycle for 83 a is the central scale, with an average period of lake level change for 54 a. The lake level has experienced three transitions in water abundance and dryness since 1880, and it will gradually enter the next dry season in the future. The cross-wavelet analysis revealed that precipitation is the main driver of lake level change under natural conditions. In addition, the transition of the resonance cycle phase between temperature and runoff in the late 1980s indicates that the increasing meltwater supply due to rising temperature results in the recovery of lake level, instead of a negative effect of evaporation loss. The variation in runoff and lake level can be influenced by atmospheric circulation in the region through its control on precipitation. The relationship of cross-wavelet analysis between NAO and runoff is more closely related than SOI, which plays a more important role in lake level changes.

Key words: Lake Balkhash; water level; runoff; climate change; wavelet analysis; Central Asia